

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 66.086.4

УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ ВЛАЖНОГО КОЛЛОИДНОГО КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СБРОСОМ ДАВЛЕНИЯ

*канд. физ.-мат. наук М.А. БРИЧ, Н.М. ГОРБАЧЁВ,
канд. физ.-мат. наук И.А. КОЗНАЧЕЕВ, Д.С. МАКАРЕНКО
(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск)
канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ, канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Термомеханическая обработка сбросом давления находит широкое применение в процессах сушки и пропитки древесины, подготовки растительного сырья в ходе экстракции и гидролиза. Актуальной задачей является поиск оптимальных режимных параметров такой обработки, опирающийся на построение математической модели совместных процессов внутри влажного коллоидного капиллярно-пористого тела, подверженного декомпрессии. В работе приведены результаты численного моделирования совместных процессов тепломассопереноса и упругого деформирования образца прямоугольной формы из анизотропного влажного капиллярно-пористого материала, имеющих место при термомеханической обработке. Проанализирована зависимость упругих напряжений от свойств материала и режимных параметров, определены условия разрушения образца. Полученные зависимости позволяют определить основные режимные параметры, обеспечивающие «безопасный» режим обработки материала с учетом его размеров, влагосодержания и проницаемости.

Ключевые слова: *термомеханическая обработка, сброс давления, паровзрывной автогидролиз.*

Введение. Термомеханическая обработка влажного пористого материала сбросом давления заключается в его нагреве под давлением выше линии насыщения с последующей быстрой декомпрессией. Если время сброса давления значительно меньше времени релаксации давления в материале, возникающий нерелаксируемый градиент давления парожидкостной среды создает в материале механические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Фильтрационный двухфазный поток при декомпрессии выносит из материала воду и водяной пар, в результате содержание влаги в материале снижается и меняется распределение влаги в нем. Этот эффект используется при термомеханическом обезвоживании, обеспечивая быструю и качественную сушку даже крупномерной древесины [1]. Вместе с тем, если напряжения, возникающие при декомпрессии, достаточно велики, обработка сбросом давления позволяет обеспечить эффективную деструкцию материала, увеличить его проницаемость и удельную поверхность. Такой эффект декомпрессии используется на стадии подготовки растительного сырья в целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, в процессах экстракции [2]. Происходящее при декомпрессии разволокнение материалов увеличивает их проницаемость и доступность для реагентов при последующей обработке, позволяя значительно снизить потребление химических реагентов в процессах гидролиза, повысить отдачу при экстракции. Происходящее при такой обработке разрушение древесины на микроуровне значительно повышает эффективность пропитки.

Поиск оптимальных режимов обработки в зависимости от требований к конечному продукту и способов реализации этой технологии является актуальной задачей. Длительный прогрев материала при существующих способах реализации (когда используется конвективный нагрев) снижает его производительность. Эффективным решением является микроволновой нагрев.

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова реализована технология сушки со сбросом давления с СВЧ-нагревом материала под давлением. При интенсивном микроволновом нагреве влажного пористого тела в нем также возникает нерелаксируемый градиент давления парожидкостной среды, приводящий к возникновению в нем фильтрационного потока [3]. Этот способ термомеханической обработки следует считать перспективным, т.к. он обеспечивает разрушение растительного материала на клеточном уровне и интенсифицирует механохимические процессы в нем.

Для управления процессом термомеханической обработки сбросом давления или интенсивного микроволнового нагрева коллоидного капиллярно-пористого материала необходима информация о зави-

симости распределения напряжений в этом материале от режима обработки, характеризующегося давлением и температурой запирающего газа, способом и интенсивностью нагрева, временем декомпрессии, и от свойств материала – его влажности, теплопроводности, проницаемости, диэлектрических свойств, модуля упругости, размеров. Если время декомпрессии или нагрева меньше времени релаксации давления в этом материале, то контроль в нем распределения влажности и градиента давлений, а значит, и напряжений, практически невозможен. Определение режимов обработки возможно в этом случае только на основе адекватных математических моделей тепло- и массообмена и упругонапряженного состояния.

В настоящее время в связи с использованием паровзрывного автогидролиза в промышленности активно ведутся исследования по установлению зависимости изменения удельной поверхности древесины от перепада давления и времени декомпрессии, например, работы А.Б. Просвирникова [4], а также работы по исследованию микроволнового излучения на деструкцию растительных материалов, проводимые в США [5]. Однако все эти работы относятся к исследованию обработки капиллярно-пористых тел, а большинство материалов, подвергаемых этой обработке, являются коллоидными капиллярно-пористыми материалами, снижение влажности в которых сопровождается сокращением их размеров (усушкой), приводящим к возникновению в них внутренних напряжений. Влияние усушки на напряженное состояние при постоянном давлении рассматривалось в работе [6], где показано, что при интенсивном обезвоживании формируется неравномерное распределение влагосодержания по объему материала.

В настоящей работе решается задача по определению напряжений в капиллярно-пористом материале при его сушке со сбросом давления с учетом совместного действия факторов градиента давления и усушки.

Расчетная модель. Расчеты проведены для образца прямоугольной формы из влажного капиллярно-пористого материала – древесины (сосна), с характерными размерами L_x , L_y , L_z (рисунок 1). Предполагается, что волокна расположены вдоль оси z и выполняется условие $L_x \ll L_y \ll L_z$. В этом случае потоки в направлении y и z незначительны в сравнении с потоками в направлении x , что позволяет рассматривать зависимость параметров состояния только от времени и координаты x (за исключением деформации в направлении y , которая может оказывать значительное влияние на компоненту тензора напряжений σ_{yy} , что важно при оценке условий разрушения). Условие $L_z \gg L_y$ гарантирует низкие значения потоков в направлении z , несмотря на тот факт, что проницаемость древесины вдоль волокон выше, чем в поперечном направлении. Также предполагалось, что упругие свойства материала в плоскости, перпендикулярной к направлению волокон, изотропны.

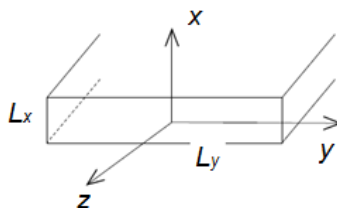


Рисунок 1. – Расчетные геометрические параметры образца и система координат

Процессы тепло-массообмена и деформирования протекают совместно и являются взаимосвязанными, однако, если пренебречь изменениями фильтрационных свойств порового пространства, вызванными механическими деформациями, то задача тепло-массообмена может рассматриваться независимо, что существенно упрощает решение.

Математическая модель тепло- и массообмена включает уравнения баланса массы и энергии, уравнения движения в форме уравнения фильтрации двухфазной среды, выраженные в форме обобщенного закона Дарси с коэффициентами относительной фазовой проницаемости для жидкой и газообразной фаз:

$$v_i = -K \frac{k_i(s)}{\eta_i} \nabla p, \quad (1)$$

где v_i – скорость фильтрации i -го компонента;
 η_i – динамическая вязкость i -го компонента;
 p – давление;
 K – коэффициент проницаемости капиллярно-пористого материала;

$k_i(s)$ – относительная фазовая проницаемость для жидкой и газообразной фаз, зависящая от влагосодержания s , которая рассчитывается по формулам [7]:

$$k_g(s) = \begin{cases} 0, & 0 \leq s \leq 0,1, \\ \left(\frac{s-0,1}{0,9}\right)^{3,5} (4-3s), & 0,1 \leq s \leq 1; \end{cases} \quad k_l(s) = \begin{cases} \left(\frac{0,85-s}{0,8}\right)^{3,5}, & 0 \leq s \leq 0,8, \\ 0, & 0,8 \leq s \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$

где насыщенность s связана со значением влагосодержания w следующим образом:

$$s = 1 - w \frac{\rho_M^0 (1-\gamma)}{\rho^0 \gamma}, \quad (3)$$

где ρ^0 – плотность воды;

ρ_M^0 – плотность сухого материала;

γ – пористость.

Граничные условия для поверхности образца включают в себя условие постоянной температуры, которая соответствует температуре насыщения при заданном внешнем давлении, и условие свободного удаления парогазовой смеси с поверхности материала в окружающую среду с заданным давлением $P_{OC}(t)$. В начальный момент времени $P_{OC} = P_0$, затем линейно снижается до атмосферного давления за время τ_p .

При моделировании использовался метод численного решения Патанкара [8].

Деформация образца рассчитывалась на основании обычных соотношений теории упругости [9] – соотношений между компонентами тензора напряжений σ_{ik} и тензора деформаций u_{ik} , которые в случае деформации только в двух направлениях (мы пренебрегаем деформацией вдоль волокон (ось z)) принимают форму

$$\sigma_{ik} = \kappa u_{nn} \delta_{ik} + 2\mu \left(u_{ik} - \frac{1}{2} u_{nn} \delta_{ik} \right) + \kappa \beta (w^* - w) \delta_{ik}, \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{E}{2(1-2\nu)}, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (6)$$

$$u_{ik} = \frac{1}{2} (\partial_i U_k + \partial_k U_i), \quad (7)$$

$$\partial_k \sigma_{ik} + F_i = 0, \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = -\nabla P, \quad (9)$$

$$\partial_k \equiv \partial / \partial x_k^0,$$

где κ – объемный модуль упругости;

β – коэффициент усушки;

w^* – критическое влагосодержание;

E – модуль Юнга в направлении поперек волокон;

ν – коэффициент Пуассона;

μ – модуль сдвига;

$\mathbf{U} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ – вектор смещения точек образца вследствие деформации;

\mathbf{F} – плотность объемных сил;

δ_{ik} – символы Кронекера.

Условием разрушения материала является превышение какой-либо из компонент тензора напряжений значения предельного напряжения σ^* . Зависимости величины предельного напряжения σ^* и модуля Юнга E от температуры и влагосодержания аппроксимировались линейными сплайнами, построенными на основании данных [11]. Зависимость коэффициента усушки от влагосодержания определена равенствами [10]

$$\beta = 0,18 (w < w^*), \beta = 0 (w > w^*), w^* = 0,25.$$

Для коэффициента Пуассона было принято значение $\nu = 0,4$ [12].

Результаты расчета и заключение. Была проведена серия расчетов для различных значений размера образца L_x , начального влагосодержания w_0 и начального давления P_0 , в результате которых определена область значений указанных параметров, при которых происходит разрушение образца. Линии, представленные на рисунке 2, соответствуют пограничным значениям P_0 и L_x при разных значениях w_0 . Области параметров, расположенные правее и выше соответствующей кривой, отвечают условиям разрушения.

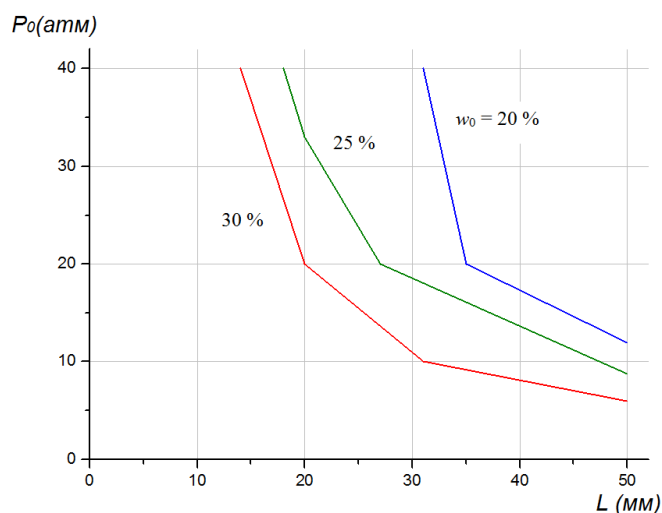


Рисунок 2. – Диаграмма критических значений параметров ($\tau_p = 0,5$ с; $K = 0,2 \cdot 10^{-12}$ м²)

Расчеты также показали, что при малых временах сброса основную роль в процессах разрушения играет градиент давления, а усушка вносит сопоставимый вклад при $\tau_p \geq 10$ с.

Для образцов из материалов растительного происхождения, подвергаемых интенсивному обезвоживанию (термомеханическое обезвоживание со сбросом давления, интенсивный микроволновой нагрев) в случае, когда влагосодержание материала или отдельных областей в нем находится вблизи предела гигроскопичности или меньше ее, при выборе режима обработки необходимо учитывать напряжение от усушки, если характерные размеры образцов превышают 20 мм.

При времени сброса давления значительно меньше времени релаксации давлений в обрабатываемом материале напряжение, вызванное градиентом давления, значительно превышает напряжение от усушки.

Полученные зависимости позволяют определить основные режимные параметры, обеспечивающие «безопасный» режим обработки материала с учетом его размеров, влагосодержания и проницаемости. Эксперименты по обезвоживанию крупномерной древесины (до 200 мм), проведенные в Институте тепло- и массообмена, согласуются с полученными результатами [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев, Н.М. Высокотемпературная сушка крупномерной древесины методом сброса давления / Н.М. Горбачев, В.П. Кожин // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) (СЭТТ-2011) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 20–23 сентября 2011 г. – М. : МГАУ, 2011.
2. Лыков, А.В. Исследование процессов сушки в поле высокой частоты / А.В. Лыков, Г.Д. Максимов // Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1957. – С. 133–142.
3. US Patent 6596975. Method for increasing of permeability of wood / Vinden P. Romero, F. Torgovnikov ; 2003.
4. Просвирников, Д.Б. Совершенствование техники и технологии процесса высокотемпературной паровзрывной обработки древесных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.Б. Просвирников. – Казань, 2013. – 19 с.
5. Li, Xingian. A single cell model for pretreatment of wood by microwave explosion / Xingian Li // Holz forschung. – 2010. – Vol. 64. – P. 633–637.
6. Ишлинский, А.Ю. Прикладные задачи механики / А.Ю. Ишлинский : – М. : Наука, 1986. – 875 с.
7. Muskat, M. The flow of homogeneous fluids through porous media / M. Muskat. I.W. Edwards, Inc., Ann Arbor, Michigan, 1946.
8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : [пер. с англ.] / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

9. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1987. – 246 с.
10. Simpson, W.T. Drying and control of moisture content and dimensional changes / W.T. Simpson // In: Wood handbook – Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Madison, 2010.
11. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины : учебник для вузов / П.С. Серговский, А.И. Расев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Лесн. пром-ть, 1987. – 360 с.
12. Green, D.W. Mechanical Properties of Wood / D.W. Green, J.E. Winandy, D.E. Kretschmann // In: Wood handbook – Wood as an engineering material, U.S. Department of Agriculture Forest Service, Madison, 1999.

Поступила 17.12.2019

DESTRUCTION CONDITIONS OF THE WET COLLOIDAL CAPILLARY-POROUS MATERIAL DURING THERMOMECHANICAL TREATMENT BY PRESSURE DROP

**M. BRITCH, N. GORBACHOV, I. KOZNACHEEV,
D. MAKARENKO, Y. GROZBERG, A. ADAMOVICH,**

Thermomechanical treatment by pressure drop is widely used in the drying and impregnation of wood, pretreatment of plant materials during extraction and hydrolysis. An urgent task is to find the optimal regime parameters of such processing, based on the construction of a mathematical model of combined processes inside a wet colloidal capillary-porous material subjected to decompression. The paper presents the results of numerical modeling of joint heat and mass transfer and elastic deformation of a rectangular sample of anisotropic wet capillary-porous material that occur during thermomechanical processing. The dependence of elastic stresses on the properties of the material and operating parameters is analyzed, and conditions for the destruction of the sample are determined. The obtained dependences make it possible to determine the main operating parameters providing a “safe” mode of processing the material, taking into account its size, moisture content and permeability.

Keywords: thermomechanical treatment, pressure relief, vapor explosion autohydrolysis.